

Tomografía Ultrasónica En La Evaluación De Estructuras De Hormigón Armado

Ultrasonic Tomography To Appraise Reinforced Concrete Structures

Autores

Javier Ballote Álvarez¹, Iván J. Gómez Matías², Orlando R. Carraz Hernández³, Alejandro Fernández Domínguez⁴

¹ Ingeniero Geofísico, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría" (CUJAE); Calle 114 % Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana; jballote@civil.cujae.edu.cu

² Estudiante de Ingeniería Geofísica; Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría" (CUJAE); Calle 114 % Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana;

³ Ingeniero Geofísico, Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría" (CUJAE); Calle 114 % Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana; orlando@civil.cujae.edu.cu

⁴ Ingeniero Civil, Máster en Ciencias, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría" (CUJAE); Calle 114 % Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana; afernandezd@civil.cujae.edu.cu

RESUMEN

La tomografía ultrasónica en los últimos años ha tenido un gran avance como ensayo no destructivo (END) para el diagnóstico de las patologías de las obras civiles, pues permite obtener una imagen del medio con un **gran poder resolutorio** que responde a las heterogeneidades o discontinuidades del material. En la presente investigación se realizó una tomografía ultrasónica en un caso de estudio utilizando un equipo convencional de velocidad del pulso ultrasónico (VPU), en vez de un tomógrafo ultrasónico. Se realizaron 15 mediciones en tres lados de una viga empleando distintas configuraciones de tiros directos y semi-directos, y mediante la solución de un problema inverso lineal se obtuvo una imagen con la distribución de lentitudes (inverso de la velocidad). Para la solución del problema inverso de la tomografía ultrasónica se utilizó un algoritmo diseñado en MATLAB, capaz de tratar un problema inverso lineal discreto general, a partir de los datos del sistema de observación a través del método general de descomposición en valores singulares (SVD). El caso de estudio consistió en una viga, que previamente había sido sometida a cargas, mediante el diseño del sistema de observación y la inversión tomográfica se identificaron zonas de altos valores de lentitudes (velocidades disminuidas) correspondientes a zonas de fallas y se identificaron los aceros de cerco por los valores bajos de lentitudes (velocidades aumentadas). La calidad del sistema fue evaluada de alta con un error de 6,27%.

Palabras claves: Método de ultrasonido, patologías del hormigón armado, problema inverso, tomografía ultrasónica

ABSTRACT

Ultrasonic tomography in recent years has had a great advance as a non-destructive test (NDT) for the diagnosis of the pathologies of civil works, since it allows to obtain an image of the environment with a great resolving power that responds to the heterogeneities or discontinuities of the material. In the present research, an ultrasonic tomography was performed in a case study using conventional ultrasonic pulse velocity (UPV) equipment, instead of an ultrasonic tomograph. 15 measurements were made on three sides of a beam using different configurations of direct and semi-direct shots, and by solving a linear inverse problem an image was obtained with the distribution of slowness (inverse of velocity). For the solution of the inverse problem of ultrasonic tomography, an algorithm designed in MATLAB was used, capable of treating a general discrete linear inverse problem, from the data of the observation system through the general method of Singular Value Decomposition (SVD). The case study consisted of a beam, which had previously been subjected to loads, through the design of the observation system and the tomographic inversion, areas of high values of slowness (decreased speeds) corresponding to fault zones were identified and the fence steels were identified by the low values of slowness (increased speeds). The quality of the system was evaluated high with an error of 6,27%.

Keywords: Ultrasound method, ultrasonic tomography, reinforced concrete pathologies, reverse problem.

1. Introducción

La velocidad de pulso ultrasónico (VPU) es un ensayo no destructivo (END) que se emplea desde mediados del siglo XX en estudios de estructuras de hormigón. La VPU se estima según la expresión 1, y es el tiempo (t) dado en μs que emplea un impulso ultrasónico con frecuencia entre 20 y 150 kHz en recorrer una distancia de (L) metros entre un transductor emisor Tx y un transductor receptor Rx, ambos acoplados al hormigón según la expresión 1.

$$VPU = \frac{L}{t}, (\text{m/s}) \quad (1)$$

El pulso emitido por el transductor se deforma a medida que se propaga por el hormigón, como resultado de las interacciones con las heterogeneidades del medio, surgiendo así un sistema complejo de ondas elásticas que incluye ondas longitudinales y transversales fundamentalmente. Este valor del pulso (longitudinal o transversal) depende de las propiedades mecánicas del hormigón, principalmente sus constantes elásticas y la resistencia mecánica. Por esta razón a partir de los cambios en velocidad se pueden inferir los cambios en la masa de hormigón. Así una región de baja compactación, grietas o defectos le corresponde un valor bajo de velocidad. Por tanto, el valor de la velocidad del pulso puede ser utilizado como criterio de calidad del hormigón [1].

Estos elementos posibilitan que la VPU sea empleada en la determinación de grietas, fisuras y la estimación de la profundidad de éstas en el hormigón armado como resultado de los esfuerzos provocados por fenómenos térmicos y de retracción, que no traen peligro estructural, pero comprometen la estanqueidad y desempeño de las estructuras como edificaciones, túneles y presas. Estas patologías pueden provenir de la falta de capacidad de la estructura en absorber tensiones, sea por subestimación de los esfuerzos durante el dimensionamiento o por la disminución de la resistencia del material [2, 3, 4, 5]. La detección oportuna de estos defectos puede evitar el rápido deterioro y prolongar la vida útil de las estructuras [2, 6].

La determinación de las oquedades o huecos es otro de elementos que puede ser estudiado con la VPU. Según BSI – 1881 [7], la presencia de huecos dentro del hormigón armado provoca la obstrucción de la trayectoria de propagación de la onda incidente, moviéndose por la matriz y no por la oquedad, resultando en una propagación de la onda más prolongada. Este efecto puede utilizarse para localizar defectos de más de 100 mm de diámetro o profundidad, ya que los defectos menores no suelen tener efectos significativos en el tiempo de propagación. [8, 9, 10, 11, 12].

En el campo de los ultrasonidos, un avance significativo ha sido la tomografía ultrasónica. Esta técnica se refiere a la obtención de una imagen de una sección transversal de una estructura que ha sido reconstruida a partir de datos de transmisión o de reflexión producidos al hacer incidir sobre ella, desde varias direcciones, la emisión de una fuente de iluminación [13]. En este caso, la fuente de energía para “iluminar” el objeto desde diferentes direcciones son las ondas ultrasónicas.

La tomografía ultrasónica, tiene una amplia aplicación en la medicina nuclear y en radioastronomía, pero a partir del final del siglo XX ha comenzado a utilizarse en la ingeniería civil por su gran poder resolutivo [14, 15]. El uso de imágenes ultrasónicas para evaluar la calidad y estado técnico de las estructuras de hormigón armado mediante la identificación de heterogeneidades, defectos o grietas es una solución novedosa para el diagnóstico de las patologías de las obras civiles [16]. La tomografía ultrasónica presenta gran capacidad para localizar y caracterizar defectos en el hormigón, zonas de humedad, inclusiones involuntarias de materiales extraños, daños generados por heladas o por incendios.

Para el desarrollo del método de ultrasonido en su variante de tomografía, no necesariamente es necesario la compra de equipos multi-transductores como tomógrafos ultrasónicos. Si bien, estos posibilitan una mayor rapidez en la toma y procesamiento de los datos, existen procedimientos matemáticos que convencionalmente son utilizados en la geofísica para la solución del problema inverso que pueden adaptarse al caso ultrasónico.

En Cuba, las normas vigentes que rigen la realización de este END se concentran fundamentalmente en la determinación del pulso ultrasónico como índice para determinar parámetros físico-mecánicos del hormigón armado, sin embargo, no se abordan las potencialidades que brinda este método para la obtención de una imagen 2D o 3D del medio basado en el comportamiento de las ondas ultrasónicas.

En este artículo se propone un sistema de observación para la medición de la velocidad del pulso ultrasónico que permita realizar una evaluación integral de las estructuras de hormigón armado, se diseña un sistema de adquisición que permita evaluar integralmente las estructuras de hormigón armado y se evalúa el grado de deterioro de un caso de estudio a partir del método de ultrasonido.

2. Materiales y métodos

2.1. Sistema de observación y toma de datos

La variante de tomografía propuesta consiste en medir la velocidad del pulso ultrasónico con un equipo convencional utilizando distintas configuraciones, principalmente las de tiro directo y tiro semidirecto (excitación directa y semidirecta). En este caso, si se aplica la teoría de los problemas inversos conocida en la ingeniería geofísica, puede estimarse el modelo de partida de los datos. Esto ha sido probado con éxito para el caso de la tomografía sísmica por Blanco [17]. Las semejanzas entre ambas tomografías, sísmica y ultrasónica, hacen posible que pueda aplicarse el procedimiento planteado por la autora para la tomografía ultrasónica.

Para evaluar el poder resolutorio del método de ultrasonido en su variante de tomografía se realizaron mediciones en un caso de estudio. Se trata de una viga de hormigón armado que se encuentra en el Centro de Estudios de Construcción y Arquitectura Tropical (CECAT) de la Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría (CUJAE). La viga presenta 5 m de longitud y 0,40 m de ancho, aunque las mediciones solo se realizaron en el tercio central de la misma (figura 1). Los aceros de refuerzo tienen un diámetro de 12 mm y se encuentran distribuidos según se muestra en la figura 1.

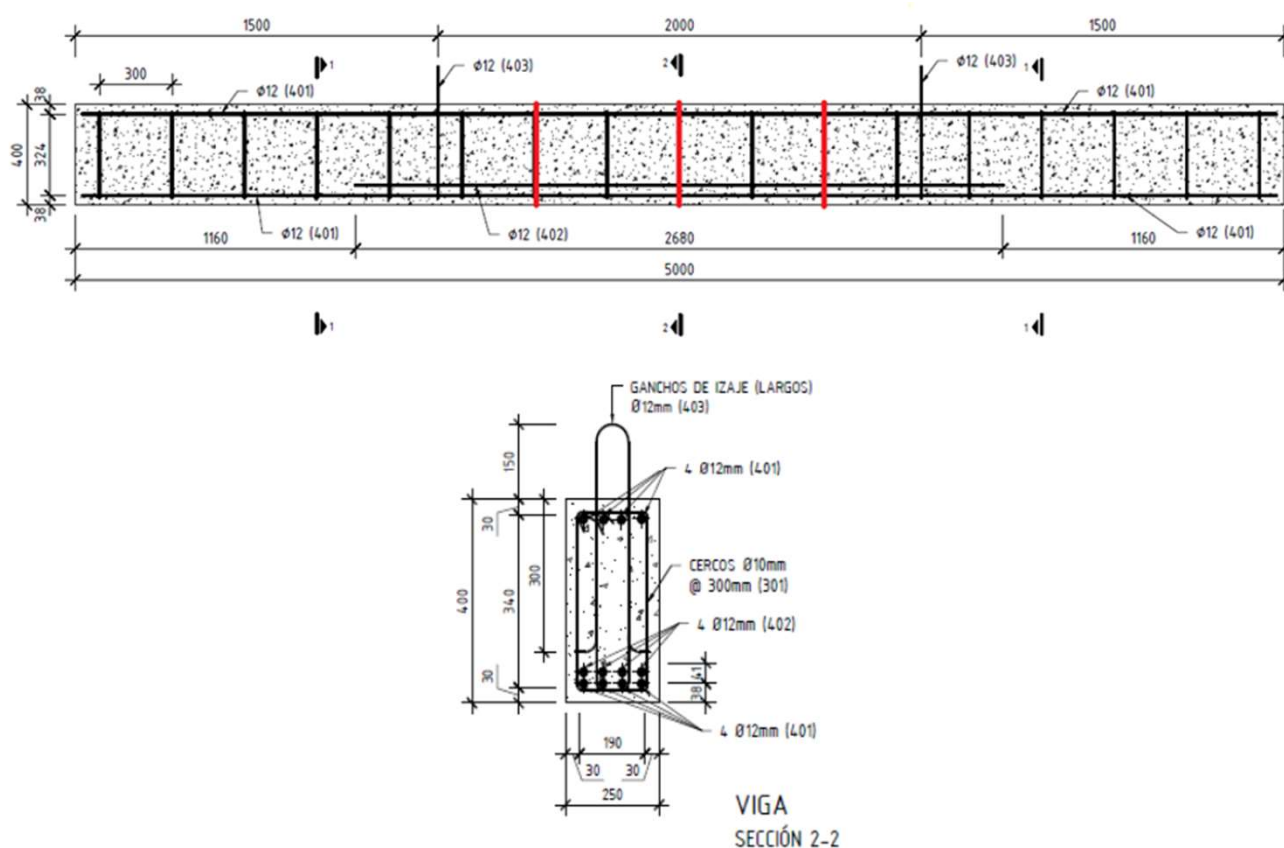


Figura 1: Plano de la viga de estudio (en color rojo los perfiles donde se realizaron las mediciones de ultrasonido). Sección de estudio de la viga

Las mediciones se realizaron con el equipo Pundit Lab de fabricación suiza perteneciente al CECAT. El Pundit Lab consta de dos transductores, uno transmisor Tx y otro receptor Rx, que operan a una frecuencia de 54 kHz, una unidad central y su fuente de alimentación. Los valores obtenidos por el equipo corresponden a los tiempos de propagación de la onda por el medio.

Para realizar las mediciones se escogió

el tercio central de la viga porque es donde se observan las mayores muestras de deterioro. Esto se debe a que la viga, anteriormente, había sido sometida a diferentes pruebas de carga para medir su capacidad soportante. Los perfiles trazados son transversales a la viga y se encuentran separados entre sí a una distancia de 60 cm. Los perfiles I y III, se encuentran cada uno a 40 cm de los ganchos de izaje (figura 1).

La viga presenta una sección de 25 x 40 cm, y tiene el inconveniente que por uno de sus lados se encuentra apoyada en el piso, por lo que no se pueden realizar mediciones en esa cara. Atendiendo a esto y a las características del procedimiento de Blanco [17], el cual necesita discretizar el medio, se definió un sistema de observación que cumpliera con las premisas establecidas y tuviera en cuenta esa limitante.

Primero se estableció un sistema de referencia, que permitiese la introducción de los datos de forma correcta. En el mismo, el eje de coordenadas (0,0) se corresponde con el borde inferior izquierdo y las coordenadas (25,40) con el borde superior derecho. El medio quedó discretizado en 25 celdas rectangulares de 5 x 8 cm. Se definieron 15 tiros (mediciones), cinco tiros directos ubicando los Tx en la cara A de la viga y los Rx en la cara B, separados cada uno de ellos a 8 cm (figura 2).

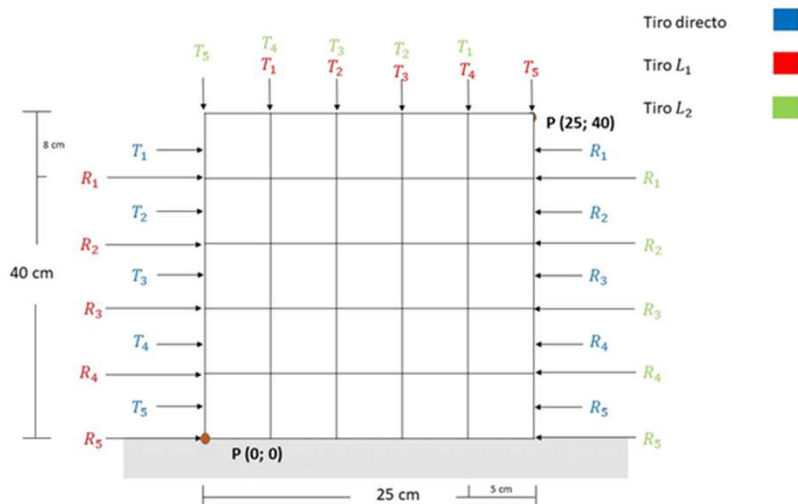


Figura 2: Sistema de observación planteado para la toma de los datos en una sección de la viga (caras A y B).

Para los tiros semidirectos, se ubicaron los Tx en el lado superior de la viga separado a 5 cm y los Rx para L1 se ubicaron en la cara A y para L2 en la cara B. Tanto los transductores Tx como Rx se fueron moviendo de manera que los rayos inclinados pasaran por la diagonal principal de las celdas. Para el acoplamiento entre los transductores y el hormigón, se utilizó grasa gruesa de preservo.

2.2. Procesamiento de los datos

La teoría de los problemas inversos puede aplicarse a muchas ramas de la ingeniería y de la ciencia. Un problema inverso es una estructura general que se usa para convertir las mediciones observadas en información acerca de un sistema u objeto físico. Es aquel problema en el que los valores de algunos parámetros de un modelo deben ser obtenidos a partir de los datos observados. La interpretación geofísica tiene sus fundamentos matemáticos en la teoría de los problemas inversos, ya que los valores de los parámetros de un modelo geofísico deben ser obtenidos a partir de los datos observados [17].

En el ámbito científico, frecuentemente se desea relacionar los parámetros físicos que caracterizan un modelo **m**, con observaciones recolectadas que componen algún conjunto de datos **d**, de manera que se puede especificar mediante la expresión 2, una función **G**, que relacione **m** y **d**:

$$G(m) = d \quad (2)$$

Esto se conoce como problema directo, y consiste en encontrar **d** datos, dado un operador **G** y un modelo **m**. En el problema inverso (expresión 3), consiste en buscar los parámetros de un modelo **m**, dados un operador inverso **G** y unos datos observados **d**.

$$m = G^T d \quad (3)$$

En el caso de la tomografía, se está ante un problema inverso, pues se tiene un conjunto de datos observados y es necesario obtener los parámetros del modelo. Para la solución del problema se utilizó el *script* confeccionado por Blanco [17] en lenguaje de programación MATLAB®. La elección del lenguaje por parte de la autora se basó esencialmente en la disponibilidad de un numeroso repertorio de funciones predefinidas, que convierten la tarea de desarrollar un algoritmo en “armar” una secuencia de bloques.

En la inversión de la matriz de datos intervienen varios procesos intermedios, como la descomposición de valores singulares y el cálculo de la inversa generalizada. A partir de estos procedimientos se obtiene un conjunto de resultados intermedios cuyo análisis posibilita la interpretación de la calidad y estabilidad del modelo que se espera obtener.

El algoritmo sigue los siguientes pasos:

1. Entrada de los datos
2. Discretización del medio
3. Análisis de la trayectoria de los rayos
4. Cálculo del arreglo de distancias desde la fuente hasta el receptor a lo largo de la trayectoria del rayo
5. Construcción de la matriz G
6. Obtener gráficos del sistema de observación y de la iluminación del medio
7. Descomposición de la matriz G en valores singulares
8. Inversión de la matriz y resolución del problema inverso

2.3. Resultados

2.3.1. Obtención de los gráficos del sistema de observación y de la iluminación del medio.

El modelo del tiempo de propagación a lo largo de la trayectoria de un rayo (expresión 4), entre la fuente y el receptor, es una integral de línea a lo largo de la trayectoria del rayo (en segundos).

$$t = \int s(x) l \, dl, \quad (4)$$

Donde

$s(x) = 1/v(x)$ es la "lentitud" (s/m) a lo largo de la trayectoria del rayo,

l , distancia en metros entre los puntos de la fuente y el receptor.

Se utilizan lentitudes en vez de velocidades, para linealizar el problema tratado. Se tomó como tiempo de fondo (que se traduce en velocidad de fondo) los tiempos promedios de todas las mediciones realizadas en los tres perfiles, este valor se sustrajo a cada una de las mediciones, con el objetivo de poder evaluar en cada tiro los contrastes de lentitudes. Esto es debido a que las velocidades disminuidas (mayores tiempos), el algoritmo las considera como velocidades negativas, matemáticamente es acertado, pero físicamente imposible. Por esto, utilizar un valor de fondo y trabajar con las contribuciones de lentitudes permite asumir valores positivos y negativos.

La representación gráfica de las trayectorias recorridas por cada uno de los rayos se muestra en la figura 3 a). De acuerdo con el sistema de adquisición planteado, la viga es atravesada por 15 rayos en cada uno de los perfiles. Cinco rayos de forma horizontal y diez son rayos inclinados. De estos últimos,

cinco corresponden a un tiro semidirecto (L1) y los cinco restantes a otro tiro semidirecto (L2).

Las líneas con diferentes colores representan las trayectorias seguidas por los rayos, donde en cada extremo de éstos se ubican una fuente y un receptor. Por otro lado, las líneas discontinuas corresponden a los límites de las celdas como resultado de la discretización del medio.

Este gráfico representa cómo los rayos están atravesando el medio; es decir, cómo es explorado el medio con el sistema de observación planteado, con el cual, a pesar de las limitaciones para medir por un lado de la viga, se asegura que al menos un rayo atraviese la celda. Esto se puede apreciar más claramente en el gráfico de iluminación (figura 3 b), el cual es un complemento del sistema de observación y es el resultado de calcular la longitud de los rayos que atraviesan la celda, por tanto, dependen del sistema de referencia utilizado.

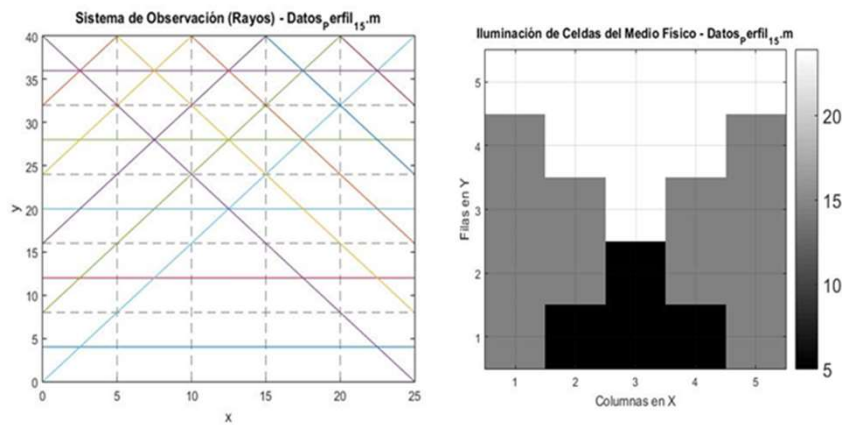


Figura 3: a) Gráfico del sistema de observación de los perfiles I, II y III. b) Gráfico de iluminación del medio con el sistema de observación planteado para los perfiles I, II y III.

La iluminación se encuentra en la escala del 5 a 25, que corresponde a la suma de las longitudes de los rayos que pasan por cada celda. Los gráficos muestran que todas las celdas no son iluminadas de manera homogénea; es decir, que el sistema de observación no está explorando todo el medio de la misma manera, provocando que la iluminación sea mejor en algunas zonas que en otras. Según la escala de tonos, la zona mejor iluminada es la que se muestra en blanco, pues una mayor cantidad de rayos la atraviesan. Por su parte, la zona peor iluminada se observa de color negro, y se encuentra en el tercio inferior de la viga, esto se debe a que solo la atraviesan los rayos horizontales del tiro directo. Es necesario tener en cuenta que el medio no está siendo explorado de manera regular, y que en la zona pobremente iluminada puede haber pérdida de información, por tanto, un débil muestreo del objeto de interés en la exploración tomográfica.

2.3.2. Obtención del gráfico de matriz G y de los valores singulares

Para una mejor observación del sistema resulta conveniente obtener el gráfico de la matriz **G**, para observar el diseño del sistema y la distribución de rayos dentro de éste. El gráfico de la matriz (figura 4), ilustra la estructura de la matriz del sistema de observación de cada perfil. Se aprecia que la matriz es dispersa, pues tiene muchos elementos iguales a cero (color azul), en verde se distinguen los elementos de los rayos horizontales y en rojo los elementos que corresponden a las distancias de los rayos inclinados. Esta distribución evidencia que se diseñó un sistema con rayos que van en las direcciones horizontal e inclinada.

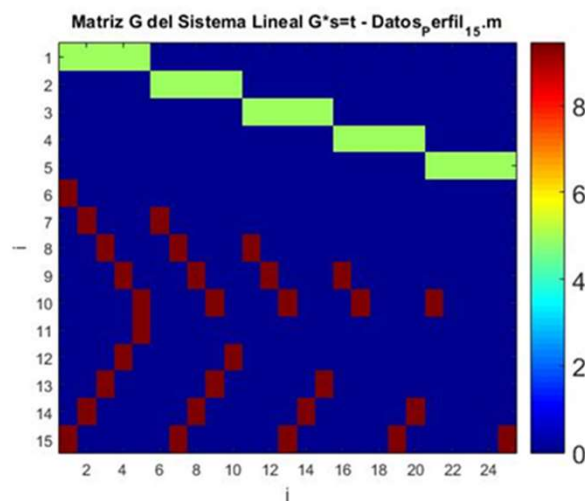


Figura 4: Gráfico de la matriz G del sistema de observación de los perfiles I, II y III.

El método de Descomposición en Valores Singulares (SVD) descompone cualquier matriz **G** en el producto de tres matrices utilizando la función **svd** de MATLAB, según la expresión 5.

$$G=U \cdot S \cdot V^T \quad (5)$$

Las matrices U y V son matrices formadas por auto vectores unitarios, mientras que la matriz S es una matriz diagonal formada por los denominados valores singulares. Los valores singulares de la matriz G (figura 5), varían entre 26 y 1, con lo cual el número de condición es 26. El número de condición se utiliza para evaluar cuantitativamente la estabilidad de la solución. Se dice que un proceso es estable si pequeños cambios en los datos conducen a pequeños cambios en los resultados. Análogamente, un proceso se dice que es inestable cuando pequeños cambios en los datos producen cambios bruscos enormes en los resultados. Los problemas inversos suelen ser inestables, donde la inestabilidad absoluta corresponde a un número de condición igual a infinito, mientras que la estabilidad absoluta corresponde a un número de condición igual a 1. Mientras mayor sea el número de condición, menos estable será la solución del problema inverso.

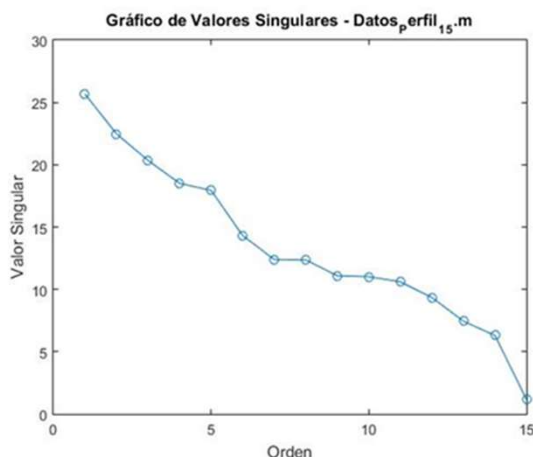


Figura 5: Gráfico de los valores singulares de los perfiles I, II y III.

Después de realizada la descomposición en valores singulares, el siguiente paso para la resolución del problema inverso es la inversión de la matriz G . La descomposición SVD puede ser usada para calcular una inversa generalizada de G , que se denota por G^+ , llamada también pseudoinversa de Moore –Penrose. Una vez determinada la pseudoinversa G^+ , se puede obtener el modelo estimado del medio m^+ de norma ℓ_2 mínima, mediante la expresión 6.

$$m^+ = G^+d \quad (6)$$

La aplicación de estas técnicas de descomposición e inversión permiten encontrar una solución aproximada útil mediante la búsqueda de un modelo m particular que minimice en alguna medida el desajuste entre los datos observados y los datos calculados Gm . La solución de mínimos cuadrados o solución de norma ℓ_2 es de especial interés, tanto porque es muy flexible a los análisis y a la intuición geométrica, como porque resulta ser estadísticamente la solución más verosímil si los errores en los datos tienen una distribución normal [18].

2.3.3. Gráficos de la matriz de resolución de los modelos (R_m)

La matriz de resolución de los modelos (figura 6a) es una matriz simétrica que constituye una medida de la capacidad de un sistema para recuperar el modelo original. En el caso más favorable, la matriz de resolución debería ser una matriz identidad y la resolución sería perfecta; sin embargo, en los problemas con rango deficiente, no es una matriz identidad, pero aun así es una matriz simétrica que describe cómo la solución inversa generalizada “deforma” el modelo original.

Las celdas (1,1) y (1,5) correspondientes a los extremos superiores del modelo tienen valores cercanos a la unidad, por lo cual, en estas celdas se puede recuperar el modelo original con mayor calidad, aunque esta información en ocasiones no es muy útil porque el objeto de interés usualmente no se encuentra en las esquinas. En la matriz diagonal reorganizada de la matriz de resolución del modelo (Figura 6b) se puede identificar con mejor claridad la distribución espacial de las celdas del modelo y su valor correspondiente de resolución.

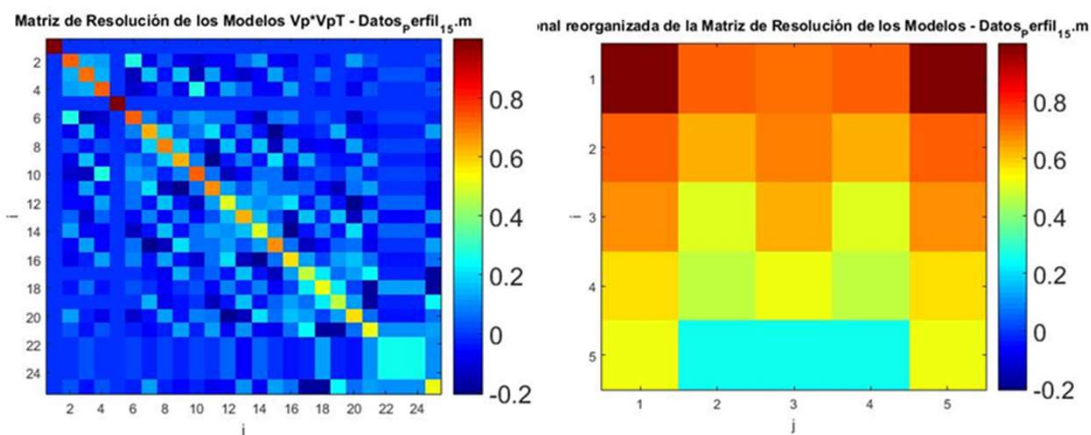


Figura 6: a) Gráfico de la matriz de resolución de los modelos de los perfiles I, II y III. b) Gráfico de la diagonal reorganizada de la matriz de resolución de los modelos de los perfiles I, II y III.

En la Figura 6 b) se observa cómo después de los bordes superiores del modelo, los lugares donde mejor se puede recuperar el modelo original son en los bordes superiores correspondientes al tope de la viga y en los laterales, pues presentan valores mayores a 0,6. Por el contrario, al tercio inferior de la viga le corresponden los valores más pequeños de la matriz diagonal (menores de 0,4), por lo que los correspondientes parámetros del modelo serán resueltos pobremente en esta área. No obstante, según Blanco [17], esto no significa que la resolución no es la mejor, es suficiente para que el sistema de observación planteado recupere los parámetros del modelo.

En la práctica, la matriz de resolución de los modelos es usada para examinar los elementos de la diagonal principal de R_m . Los elementos de la diagonal que son cercanos a uno corresponden a parámetros para los que es posible proclamar una buena resolución. Por el contrario, si algunos de los elementos de la diagonal principal son pequeños, entonces los correspondientes parámetros del modelo serán resueltos pobremente.

2.3.4. Obtención de la matriz de los parámetros del modelo

Una vez obtenida la matriz inversa generalizada, es posible resolver el problema inverso de mínimos cuadrados o de norma ℓ_2 mínima, obteniéndose un vector de parámetros del modelo $\mathbf{m}^\dagger$, cuyos elementos deben ser reorganizados en una matriz para el caso 2D o un bloque para el caso 3D.

En la figura 7 se muestran los resultados de la inversión de los datos del caso de estudio. En color azul (figura 7a) los valores más bajos de lentitudes (velocidades aumentadas) con respecto a las tomadas como lentitud de fondo. Este comportamiento en los laterales de la viga puede deberse a la ubicación del cerco (separados a 30 cm), que coincide con el trazado de los perfiles (espaciados a 60 cm) y que no se evidencia en la parte superior por la presencia de las grietas. La VPU de los aceros, según Buitrago [19] es aproximadamente 5920 m/s, superior a la velocidad del hormigón, por esto se puede localizar fácilmente el cerco en los otros dos perfiles (figuras 7b y 7c), no siendo posible hacerlo para los aceros longitudinales que se encuentran perpendiculares al perfil.

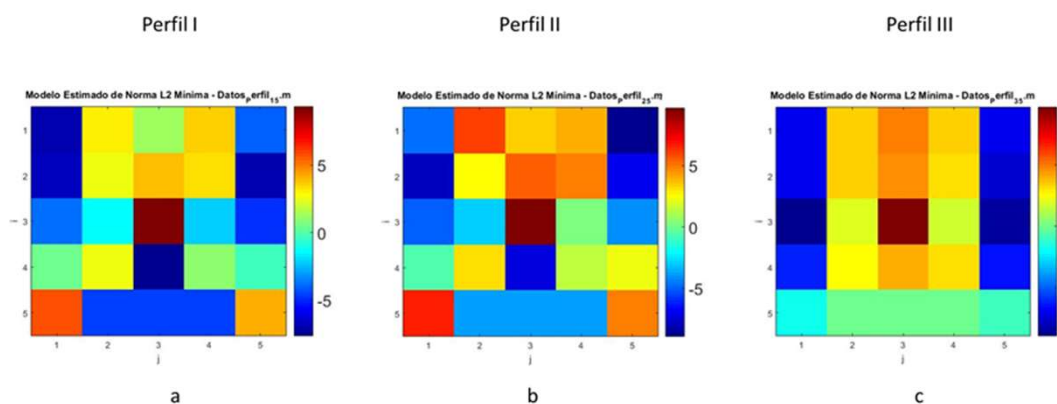


Figura 7: Matriz de los parámetros del modelo obtenido con la norma ℓ_2 mínima (mínimos cuadrados) de los perfiles I, II y III.

En el extremo superior de la viga, a pesar de que en este sector es donde se ubican los aceros longitudinales y cercos, se muestra un comportamiento completamente diferente a lo observado en los laterales, se observa un aumento en las lentitudes (velocidades disminuidas), que corresponde con lo esperado en zonas porosas, con grietas y fracturas. Durante las mediciones se identificaron varias grietas sobre la superficie de la viga (Figura 8).

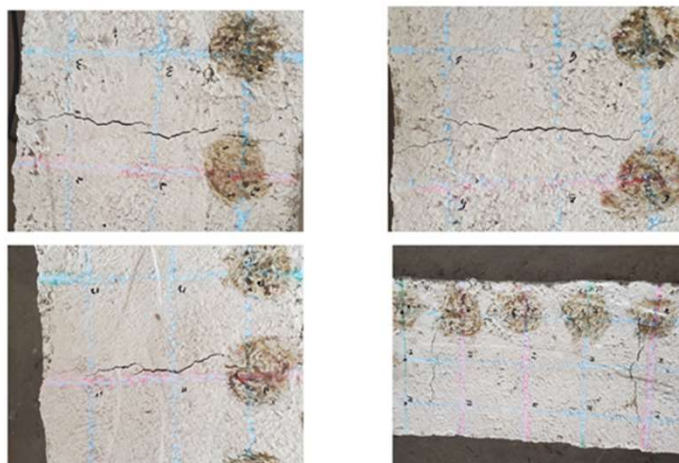


Figura 8: Grietas de la sección de estudio de la viga.

La localización de los aceros inferiores en la base de la viga (celdas inferiores), resultan menos confiables por la pobre iluminación que presentan, aunque en el caso de los perfiles I y II, las celdas de los extremos muestran una iluminación media y presentan valores elevados de lentitud (velocidades disminuidas). Una posible causa pueda ser el pobre acoplamiento de los transductores, pues los puntos de medición se ubicaban justo entre el piso y la base de la viga.

En el centro de los tres perfiles se destaca la celda con mayor valor de lentitud observado (menores velocidades). Esta celda, a diferencia de las inferiores, muestra una alta iluminación (figura 9), esto significa que una mayor cantidad de rayos la atraviesan y que la estimación resulta más confiable, por lo que puede decirse con mayor seguridad que se trata de una zona con un alto grado de agrietamiento o porosidad.

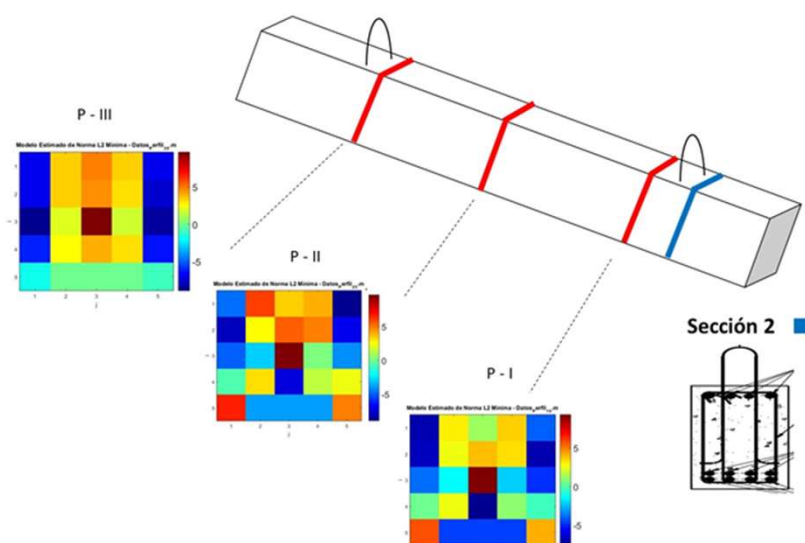


Figura 9: Matriz de los parámetros del modelo obtenido con la norma ℓ_2 mínima (mínimos cuadrados) para los tres perfiles (Elaboración propia).

A pesar de que se pueden estimar las áreas con menores valores de la velocidad de pulso ultrasónico, no es posible diferenciar las zonas de fracturas de las zonas con mayor porosidad, debido a que el comportamiento es muy similar.

Al comparar los tres perfiles, se puede decir que el perfil III presenta las mayores muestras de deterioro, al presentar los valores más elevados de lentitudes (velocidades disminuidas) en comparación con los perfiles I y II. La sección de la viga que se encuentra en mejor estado, es la correspondiente al perfil I. Si se evalúa la viga mediante tiros directos, la velocidad del pulso ultrasónico promedio de la estructura sería de 3225 m/s, con lo cual pudiese clasificarse como de alta calidad según la RED DURAR de CyTED [19]. La ventaja de la tomografía con respecto al análisis convencional que se realiza para estimar la VPU en ingeniería civil, es que la primera ofrece mayores posibilidades en el campo de la defectología, caracterizar zonas con mayor grado de agrietamiento.

En la figura 10 se observa el gráfico de los parámetros del modelo estimado en curvas de nivel que representan valores iguales de lentitudes en el plano. Los menores valores se encuentran representados con el color azul (velocidades aumentadas), que corresponden con la ubicación del cerco y, en el caso de la zona inferior de la viga se mantiene la mayor incertidumbre por ser las celdas con la iluminación más pobre. Además, con la ayuda de las curvas de nivel se logra dibujar mejor la zona de afectación por agrietamiento o de alta porosidad al centro de la viga.

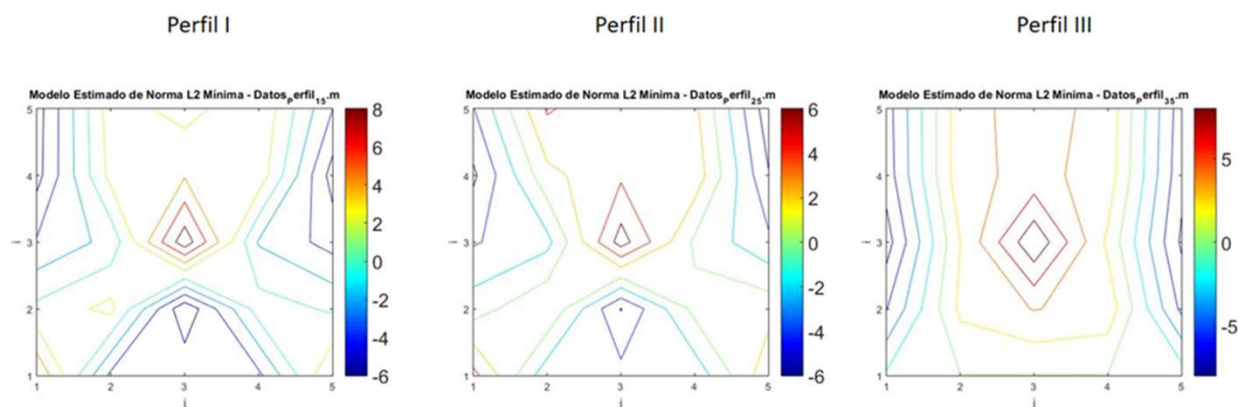


Figura 10: Gráfico en curvas de nivel de los parámetros del modelo estimado de los perfiles I, II y III.

Para trabajos futuros se propone trazar dos nuevos perfiles transversales, procurando que estos no coincidan con el cerco de aceros para poder evaluar con mejor calidad la estructura y evaluar también la influencia del mismo en las mediciones. Si fuese posible medir en todas las caras de la viga el sistema de observación propuesto sería el que se muestra en la figura 11.

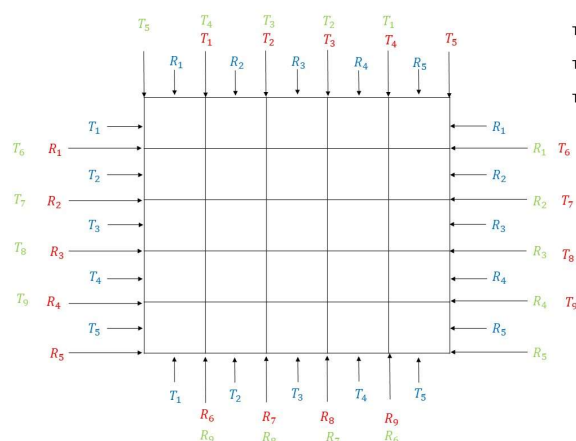


Figura 11: Sistema de observación propuesto para medir por cuatro caras de una viga o columna.

Este sistema de observación estaría compuesto por 10 tiros directos (5 horizontales y 5 verticales) y 18 tiros semidirectos (9 rayos inclinados para L1 y 9 para L2), de esta forma se garantiza que cada celda sea explorada por 4 rayos (figura 12a), de igual forma se puede observar una alta iluminación en toda la sección (figura 12b), disminuyendo el error durante la inversión de los datos.

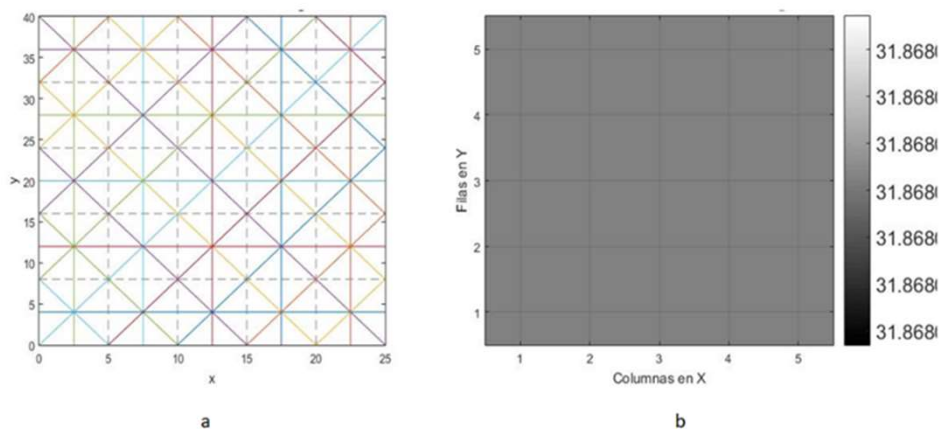


Figura 12: Sistema de observación propuesto para medir en las cuatro caras de una viga o columna a) Trazado de los rayos b) Iluminación de la viga.

Otra consideración a tener en cuenta es, siempre que sea posible, discretizar el medio en celdas cuadradas. El caso de estudio, si en vez de discretizar el medio en celdas de 5 x 8 cm para obtener un modelo de 5 filas y 5 columnas, se hubiese discretizado en celdas de 5 x 5 cm para obtener un modelo 8 filas con 5 columnas. De esta forma, se hubiese obtenido una menor área para cada celda, es decir la partición espacial sería menor, y el resultado sería una imagen con mejor iluminación del modelo. Para el caso de estudio, con el sistema de observación se tienen 15 rayos y 25 celdas, de ellas 9 celdas son iluminadas por 3 rayos, eso equivale a un 36%, sin embargo, con la propuesta de celdas 5 x 5cm, serían 24 rayos y 40 celdas para un total de 24 celdas iluminadas por 3 rayos (60%).

2.3.5. Evaluación de la calidad del modelo.

Para evaluar la calidad del modelo, Blanco [17] propone pruebas estadísticas basadas en la distribución de χ^2 , pues proporcionan una comprensión clara de la naturaleza íntima de las soluciones de mínimos cuadrados, y su análisis describe la propagación de los errores en los datos hacia los parámetros del modelo en el método de mínimos cuadrados.

El caso de estudio, al ser un problema de rango deficiente no es posible realizar las pruebas estadísticas basadas en la distribución χ^2 porque si la cantidad de datos observados (m) es menor que la cantidad de parámetros del modelo que se necesita encontrar (n), el resultado de calcular $\nu = m - n$ grados de libertad es negativo. Entonces la probabilidad de obtener un valor de χ^2 tan grande o mayor que el valor observado, no sería posible obtenerlo.

Atendiendo a esto, se consideró evaluar la calidad del modelo obtenido, evaluando el sistema de observación planteado. Para ello, se realizó la tarea directa a un modelo de velocidades conocidas empleando el mismo sistema de observación que se utilizó en el caso de estudio. El modelo escogido fue el de "tablero de damas" (*checkerboard*) (Figura 13). Esta prueba de resolución comúnmente realizada en los estudios de tomografía consiste en utilizar un modelo de prueba compuesto por perturbaciones positivas y negativas alternas que imitan a un tablero de damas [18]. En la práctica no es necesario que sean negativas y positivas, basta con que sean velocidades diferentes y siga el patrón del tablero de damas.

Con los tiempos calculados t_{cal} a partir del modelo de velocidades del tablero de damas, se realizó la tarea inversa, para estimar que tan bien el sistema de observación recupera los parámetros del modelo. La figura 13 a y b muestra las velocidades reales y las velocidades estimadas por la inversión. Al comparar ambas, se puede distinguir como el sistema de observación logra recuperar las velocidades del modelo en la parte superior de la viga, siendo la zona inferior de la viga, el área más pobremente iluminada, donde no se logra recuperar el modelo.

Para estimar el nivel de error del sistema en la recuperación del modelo (figura 13 c), se calculó mediante la ecuación:

$$\% \text{ error} = \frac{V_{\text{modelo}} - V_{\text{inversión}}}{V_{\text{modelo}}} \times 100 \quad (7)$$

La figura 13 c) muestra los porcentajes de error para cada celda del modelo. Los porcentajes negativos indican que los valores en la inversión fueron subestimados. A medida que se acerca a la base de la viga, los resultados son menos confiables, porque el nivel de los errores aumenta. En la fila de la base del modelo, las celdas de los extremos tienen poco error, pero las tres celdas centrales tienen una gran incertidumbre. El error medio del sistema es de 6,27%, con lo que se puede afirmar que la calidad del modelo obtenido mediante la inversión es buena.

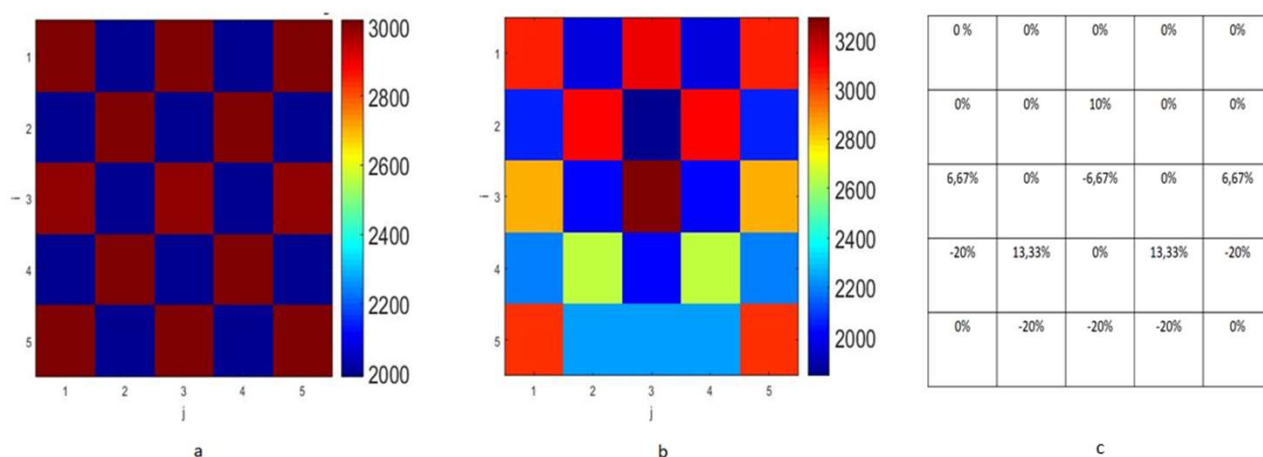


Figura 13: Modelo de velocidades del tablero de damas a) Velocidades del modelo (reales) b) Velocidades obtenidas por la inversión, c) Nivel de error para cada celda del sistema de observación planteado.

3. Conclusiones

El algoritmo desarrollado por Blanco [17] en el programa informático MATLAB junto con el diseño adecuado de un sistema de observación permiten realizar la inversión de la tomografía ultrasónica con un mayor poder resolutivo y menor ambigüedad que las mediciones del pulso ultrasónico convencionales. En este sentido, la viga de hormigón armado que se empleó como caso de estudio presenta una calidad alta según la velocidad del pulso ultrasónico (3225 m/s) y mediante la resolución del problema inverso lineal de la tomografía ultrasónica se obtuvieron tres imágenes 2D que permitieron identificar las zonas de altas velocidades del pulso ultrasónico correspondientes a los cercos de los aceros, y las zonas de bajas velocidades que caracterizan a las áreas afectadas por agrietamiento o alta porosidad.

La calidad del modelo puede considerarse aceptable (el error medio obtenido fue de 6,27%), pero debe ser mejorado utilizando un sistema de observación con celdas de 5 x 5 cm, o sea, 24 rayos y 40 celdas para un total de 24 celdas iluminadas por 3 rayos.

4. Agradecimientos

Los autores agradecen al Dr. Emilio Escartín Saulea del Departamento de Geociencias por sus oportunas observaciones y al Ing. Geovany Alemán Carmenate por la asistencia técnica.

- [1] Norma Cubana NC: 231. "Determinación, interpretación y aplicación de la velocidad del pulso ultrasónico en el hormigón". Oficina Nacional de Normalización, 2002.
- [2] Aggelis, D.; Kordatos, E.; Soulioti, D. & Matikas, T. (2010). "Combined use of thermography and ultrasound for the characterization of subsurface cracks in concrete". *Construction and Building Materials*, V. 24, n. 10:1888-1897, 2010.
- [3] Silva, L., & Helene, P. "Análise de estruturas de concreto com problemas de resistência e fissuração". In S. P. E. I. ISATA, Geraldo C. Concreto: Ciência e Tecnologia. 1ª Edição, São Paulo: Editora IBRACON (Brasil), pp. 1124-1174, 2011.
- [4] Rocha, J. H. & Povoas, Y. V. "A termografia infravermelha como um ensaio não destrutivo para a inspeção de pontes de concreto armado: Revisão do estado da arte", *Revista ALCONPAT*, V.7, No. 3, p.200-2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i3.223>
- [5] Silva, M.; Rocha, J.; Monteiro, E.; Póvoas, Y. & Kohlman, E. "Evaluación del ensayo de ultrasonido para la estimación de la profundidad de fisuras en concreto". *Revista Alconplat*, V. 9, n. 1, pp.79-92, 2018. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i1.289>
- [6] Possani, D., Lyra, D.; Conte, F.; & Morais, D. "Ondas ultrassônicas: teoria e aplicações industriais em ensaios não-destrutivos". *R. Bras. Fis. Tecnol. Apl.*, Ponta Grossa, V. 4, n. 1, p. 16-33, mai./jun. 2017. <https://10.3895/rfta.v4n1.5073>
- [7] BSI 1881. "Part 203: Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete". British Standards Institution, 1986.
- [8] Adamati, D; Lorenzi, A. & Silva, L. "Analysis of reinforced concrete structures through the ultrasonic pulse velocity: technological parameters involved". *Revista IBRACON Estruturas e Materiais*. V. 10, n. 2. 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952017000200006>
- [9] Zielińska, M., & Rucka, M. "Non-Destructive Assessment of Masonry Pillars using Ultrasonic Tomography". *Materials*, 11(12), 1-16, 2018. <https://doi.org/10.3390/ma11122543>
- [10] Andi, M., and G. R. Yohanes. "Experimental study of crack depth measurement of concrete with ultrasonic pulse velocity (UPV)". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. V. 673. n. 1. IOP Publishing, 2019.
- [11] Climent, M. Á., Miró, M., Carbajo, J., Poveda, P., de Vera, G., & Ramis, J. "Use of non-linear ultrasonic techniques to detect cracks due to steel corrosion in reinforced concrete structures". *Materials*, V. 12, n.5, 813. 2019.
- [12] Garg, S.; & Misra, S. "Efficiency of NDT techniques to detect voids in grouted post-tensioned concrete ducts". *Nondestructive Testing and Evaluation*, V.36, n.4, 366-387. 2020. doi: <https://doi.org/10.1080/10589759.2020.1758100>
- [13] Gisbert Climent, V. "Implementación de un sistema de adquisición para tomografía ultrasónica". Trabajo de fin de grado presentado para la obtención del Título de Graduado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación. Universitat Politècnica de València, 2017.
- [14] Lluveras, D. "Evaluación de materiales cementicios utilizando tomografía ultrasónica en transmisión". (Doctorado), Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. España. 2017. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.47671>
- [15] Sanderson, Tristan; Freese, K and Liu., K. "Concrete Bridge Deck Overlay Assessment using Ultrasonic Tomography." *Case Studies in Construction Materials* (2022): e00878. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00878>
- [16] Schabowicz, K. "Non-Destructive Testing of Materials in Civil Engineering". *Materials*. 2019, 12, 3237; doi:10.3390/ma12193237
- [17] Blanco, C. "Análisis y resolución del problema inverso lineal discreto. Caso de estudio de la Tomografía Sísmica 2D". Tesis para optar por el grado de Ingeniero Geofísico, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", La Habana. 2015. Disponible en: <http://tesis.cujae.edu.cu:8080/xmlui/handle/123456789/4896>
- [18] Aster, R.; Borchers, B.; & Thurber C. "Parameter Estimation and Inverse Problems". Elsevier Academic Press Publications 2011. Book. ISBN: 0-12-065604-3
- [19] Buitrago, B.; Iraiquin, I.; Mendoza, J. "Ultrasonic velocity attenuation in carbon steel specimens". *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad de Zulia, Venezuela*, 2004, v. 27, n.1, pp. 20-25. ISSN 0254-0770.
- [20] DURAR. "Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado". CYTED. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. Río de Janeiro. 1997.